

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JULIA LOPES DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DAS CARACTERÍSTICAS DO NÚCLEO DE  
TRANSFORMADORES A ÓLEO ATRAVÉS DA POTÊNCIA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016

JULIA LOPES DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DE POTÊNCIA DE TRANSFORMADORES  
COMERCIAIS ATRAVÉS DAS CARACTERÍSTICAS DO NÚCLEO**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso  
apresentado como requisito parcial do curso  
de Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.  
Orientador: Prof. Me. Marco Antonio Ferreira  
Finocchio

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento de Engenharia Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Julia Lopes de Oliveira**

### **Estimativa das características do núcleo de transformadores a óleo através da potência**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 18:00hs do dia 02/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Me(a). Jancer Frank Zanini Destro - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Luiz Marcelo Chieese da Silva - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

*I dedicate this monograph to one of my best friends and my only lover, Neil Pierce, for give me the biggest reason for me to accomplish this, a huge support, inspiration, and the three things that makes me fall in love with him again and again: love, a home, and a whole life to look forward to.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos pela oportunidade de ter conseguido, com muito sacrifício e esforço pessoal, passar alguns dos meus mais preciosos anos nesta instituição adquirindo experiência acadêmica e superando grandes obstáculos.

À minha família e a Deus, por estar sempre presente ao meu lado em todos os momentos. Também agradeço aos que me acompanharam ao longo desta jornada, aos professores e, principalmente, ao meu orientador que me forneceu conhecimentos técnicos para esse trabalho, apoio, paciência e muita dedicação.

Agradeço em especial ao meu irmão, Gabriel Ferpoli, por toda a motivação, apoio e incentivo fornecido não apenas durante aos meus estudos, mas ao longo de toda a minha vida. Desde os tapas e chutes de quando éramos crianças, aos abraços, sorrisos e olhares cúmplices que sempre me encheram de carinho, amor e orgulho.

Agradeço aos meus amigos, que sempre estiverem ao meu lado. Em especial a Tayane Fonseca, a qual me provou que amor à primeira vista existe e sempre esteve ao meu lado por todos os momentos durante o meu percurso até aqui, ao Renato Pascon, por dividir uma das pessoas mais especiais que ele possui na vida comigo e me considerar da família, a Mayara Delanhese, que me adotou quando me viu assistindo aula sem outros amigos e também passou a me dar atenção e apoio quando eu precisava, ao John Resende, que se fez inesquecível por sua quase infinita alegria, seus anos de persistência e pelo golpe mais certo que já presenciei na vida, e por último, ao Ildemison Dantas, que dividiu as suas guloseimas quando eu não tinha e sempre me ofereceu conversas divertidas. Amo todos vocês!

Força e honra.

## RESUMO

OLIVEIRA, Julia Lopes. **Estimativa das características do núcleo de transformadores a óleo através da potência.** 2016. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Este trabalho apresenta uma análise empírica aplicada às correntes do núcleo de transformadores a óleo, verificando-se a possibilidade de determinar as mesmas por meio do desenvolvimento de equações padrões. Por meio das quais será possível os cálculos das correntes sem a realização de ensaios, cujo custo para cada ensaio é de aproximadamente de R\$1.000,00. Este estudo teve como base a medição das correntes de excitação, magnetização e do ferro que serão analisadas estatisticamente e comparadas com valores obtidos diretamente por métodos de ensaio. Foram apresentados ambos os resultados, verificando a proximidade dos valores coletados pelas formas descritas e concluindo-se que a proposta é válida.

**Palavras Chaves:** Transformadores. Características do núcleo. Estatística. Ensaio. Correntes de excitação, magnetização e do ferro.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Julia Lopes. **Estimativa das características do núcleo de transformadores a óleo através da potência.** 2016. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

This paper presents a empirical analysis applied to the currents of core transformer oil, checking the possibility of determining those characteristics by developing standards equations. Through those equations it will be possible to calculate the core currents without performing tests, the cost for each of those tests comes to R\$1,000.00. This study will be based on the measurement of excitation, magnetization and iron currents that will be statistically analyzed and compared with values obtained directly from test methods. It was be presented both results by checking the proximity of the data collected by the forms described and concluding that the proposal is valid.

**Key Words:** Transformers. Characteristics of the core. Statistic. Test. Excitation, magnetization and iron currents.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TRANSFORMADOR IDEAL .....	16
FIGURA 2 - TRANSFORMADOR REAL .....	20
FIGURA 3 - CIRCUITO COM GRANDEZAS REFERIDAS .....	22
FIGURA 4 - CIRCUITO COM RESISTÊNCIA DE PERDA NO FERRO REFERIDA .....	24
FIGURA 5 – CIRCUITO COM REATÂNCIA DE MANGNETIZAÇÃO REFERIDA...	25
FIGURA 6 - CIRCUITO EQUIVALENTE COMPLETO .....	25
FIGURA 7 – ACESSÓRIOS COMPLEMENTARES. A) TANQUE DO TRANSFORMADOR; B) BUCHA; C) RADIADOR DO TRANSFORMADOR; D) COMUTADOR; E) PLACA DE IDENTIFICAÇÃO .....	32
FIGURA 8 – ENSAIO A VAZIO .....	33



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES MÉDIOS DAS CORRENTES OBTIDAS POR ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	39
TABELA 2 – VALORES MÉDIOS DAS CORRENTES OBTIDAS POR MEIO DO ENSAIO.....	39
TABELA 3 – ERRO RELATIVO .....	43

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO x TENSÃO APLICADA .....	26
GRÁFICO 2 – VALORES DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO x POTÊNCIA .....	40
GRÁFICO 3 – VALORES DA CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO x POTÊNCIA....	41
GRÁFICO 4 – VALORES DA COFRRENTE DO FERRO x POTÊNCIA .....	42
GRÁFICO 5 – VALORES DAS CORRENTES DO NÚCLEO x POTÊNCIA .....	42

## LISTA DE SÍMBOLOS

$i_1(t)$	Corrente do enrolamento primário
$i_2(t)$	Corrente do enrolamento secundário
$e_1(t)$	Tensão induzida no enrolamento primário
$e_2(t)$	Tensão induzida no enrolamento secundário
$\varphi_m(t)$	Fluxo magnético mútuo
$N_1$	Número de espiras do enrolamento primário
$N_2$	Número de espiras do enrolamento secundário
$V_1(t)$	Tensão de entrada ou tensão primária
$V_2(t)$	Tensão de saída ou tensão secundária
$\lambda_1(t)$	Fluxo concatenado com o enrolamento primário
$\phi_m$	Amplitude do fluxo magnético $\varphi_m(t)$
$E_1^{RMS}$	Valor eficaz de $e_1(t)$
$R_1$	Resistência do enrolamento primário
$R_2$	Resistência do enrolamento secundário
$jX_1$	Valor complexo da reatância do enrolamento primário
$jX_2$	Valor complexo da reatância do enrolamento secundário
$\varphi_{D1}(t)$	Fluxo magnético disperso do enrolamento primário
$\varphi_{D2}(t)$	Fluxo magnético disperso do enrolamento secundário
$L_1$	Indutância do enrolamento primário
$L_2$	Indutância do enrolamento secundário
$Z_L$	Impedância no enrolamento secundário
$E_1$	Força eletromotriz do enrolamento primário
$E_2$	Força eletromotriz do enrolamento secundário
$I_o$	Corrente de excitação
$R_f$	Resistência de perdas no ferro
$X_m$	Reatância de magnetização do transformador
$I_m$	Corrente de magnetização
$I_f$	Corrente do ferro
$\varphi_o$	Defasagem entre tensão e corrente

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 PROBLEMA.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 Objetivo geral.....	14
1.3.2 Objetivos específicos .....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 TRANSFORMADOR ELÉTRICO.....	15
2.2 TRANSFORMADOR IDEAL.....	15
2.3 TRANSFORMADOR REAL.....	20
2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE.....	22
2.5 CORRENTE DE EXCITAÇÃO.....	25
2.6 CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO.....	27
2.7 IMPEDÂNCIA.....	28
2.8 TIPOS DE NÚCLEO.....	29
2.9 TIPOS DE AÇOS.....	29
2.9.1 Aço de baixo teor de carbono.....	30
2.9.2 Aços de grão orientado.....	30
2.10 COMPONENTES CONSTRUTIVOS.....	31
2.10.1 Parte ativa.....	31
2.10.2 Acessórios complementares.....	31
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>33</b>
3.1 MÉTODO DE ENSAIO .....	33
3.2 MÉTODO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	35
3.2.1 Medidas de tendência central .....	35
3.2.2 Medidas de dispersão .....	36
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>38</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>47</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O transformador é um instrumento usado para registrar ou mudar a energia elétrica de um nível de tensão para outro, seja superior ou inferior, mantendo a frequência constante, por meio da ação de um campo magnético. Nas usinas a eletricidade é produzida com nível de tensão de 12 a 25kV, esta é elevada para valores entre 100kV a, aproximadamente, 1000kV para as transmissões a longas distâncias com baixas perdas. Em seguida essa tensão é reduzida nos locais de distribuição para valores de 12 a até 34,5kV, desse modo o uso da energia é permitido nas residências, comércios e indústrias em voltagens baixas, como 220 e 127V. Esse processo não poderia ser mais eficiente e econômico sem o uso dos transformadores (CHAPMAN, 2012).

Este equipamento é constituído por duas ou mais bobinas, as quais também podem ser chamadas de enrolamentos, e por um circuito magnético responsável pelo acoplamento dessas bobinas. Esse circuito magnético é denominado de núcleo, sendo este composto por um material ferromagnético, que possui a função de produzir um caminho de baixa relutância para o fluxo gerado.

O núcleo possui várias características, entre elas pode-se citar as correntes de excitação, magnetização e do ferro. A corrente de excitação é responsável por suprir as perdas do núcleo e por produzir o fluxo magnético, sendo este fluxo mantido pela circulação constante da corrente de magnetização. Essas propriedades serão analisadas por meio de um estudo estatístico para o desenvolvimento de um método simples e prático para que as mesmas possam ser determinadas sem a necessidade da realização de ensaios, de modo que possa ser gerado uma economia para as empresas e indústrias, uma vez que cada ensaio tem um custo de cerca de R\$1.000,00. Esta informação foi fornecida por uma empresa de transformadores à óleo do Norte do Paraná, a qual forneceu também os dados de 100 transformadores para cada uma das 15 potências estudadas.

A decisão de usar a estatística como ferramenta de estudo se deve à simplicidade e capacidade de analisar dados representativos de um lote de transformadores, fazendo uma comparação das correntes citadas anteriormente e dos

resultados obtidos por meio das mesmas. Por esta razão o método estatístico foi escolhido para este tema.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta objetiva e importante, que seja não apenas usada como auxílio, mas que possa oferecer um novo método para a determinação das correntes do núcleo de transformadores.

## **1.1 PROBLEMA**

Com certeza um profissional da área elétrica ou eletrônica se depara com um transformador elétrico, máquina presente em vários equipamentos. Por conta disso é comum situações, às vezes emergenciais, na qual é necessário realizar ensaios para obter certos valores sobre as características do núcleo. No entanto, estes ensaios são dispendiosos e levam tempo, duas coisas que toda indústria tenta evitar ao máximo.

Para resolver este problema, o que deve ser analisado inicialmente é o núcleo. O núcleo diz muito a respeito das características do transformador, e é por meio dele que se pode estimar os valores principais do mesmo, como as suas correntes. Porém, é preciso uma maneira mais simples e eficaz de se determinar esses valores, pois nos casos de fábricas e concessionárias, atualmente vários testes precisam ser feitos e normalmente não há tempo suficiente para isso.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Análises e estudos sobre as características do núcleo de transformadores e máquinas em geral são importantes por inúmeras razões. A principal delas, normalmente, é pelo fato de que por meio delas se pode calcular as perdas originadas durante o uso de tais dispositivos, o que influencia no custo de funcionamento. Porém, outra razão importante, é que por meio dessas características é possível determinar as correntes do núcleo de uma maneira rápida, simples e eficaz.

Para o setor industrial, a possibilidade de se solucionar um problema de maneira rápida e com baixo custo é um dos fatores mais buscados. Uma forma de atingir isso para o problema descrito neste trabalho, é mediante o desenvolvimento de

novas equações, as quais irão interferir de maneira positiva na previsão das correntes do transformador, por método prático empírico.

### **1.3 OBJETIVOS**

Esta seção visa apresentar o objetivo geral e os objetivos específicos, expondo claramente o escopo deste trabalho.

#### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

Realizar um estudo sobre as características do núcleo de transformadores comerciais a óleo utilizando dados levantados a partir de um lote de 100 transformadores de distribuição, que servirá para analisar o método abordado neste trabalho para a estimativa das correntes características do núcleo.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar as correntes de excitação de transformadores trifásicos a óleo com potências de 15kVA até 3MVA;
- Determinar as correntes de magnetização e no ferro para a mesma situação acima;
- Coleta dos dados para a realização da análise;
- Estimar as correntes do núcleo final dos transformadores de modo a gerar novas equações padrões gerais;
- Análise dos resultados para verificar a eficiência do método proposto por meio do erro relativo percentual.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Esta seção tem a função de definir aspectos teóricos relacionados aos equipamentos, métodos e conceitos necessários para a plena compreensão deste trabalho.

### **2.1 TRANSFORMADOR ELÉTRICO**

O transformador é uma máquina elétrica constituída por partes estáticas que, através da indução eletromagnética, transfere eletricidade de um enrolamento para outro, mantendo a frequência constante, porém com mudança nos valores das tensões, correntes e impedâncias.

Este dispositivo opera com base nos princípios eletromagnéticos da Lei de Faraday e da Lei de Lenz. Segundo a Lei de Faraday, sempre que uma tensão alternada for aplicada ao enrolamento primário, um fluxo alternado no circuito magnético será produzido, o qual irá induzir uma tensão no enrolamento secundário. Para esta situação, a Lei de Lenz determina que a força eletromotriz e a corrente induzida no secundário são tais que as linhas de força geradas contrariam o fluxo magnético estabelecido pelo primário (DIAS, 2006).

A seguir serão abordados o transformador ideal e o real, com detalhes sobre o seu funcionamento, incluindo as equações que demonstram os princípios das Leis citadas anteriormente.

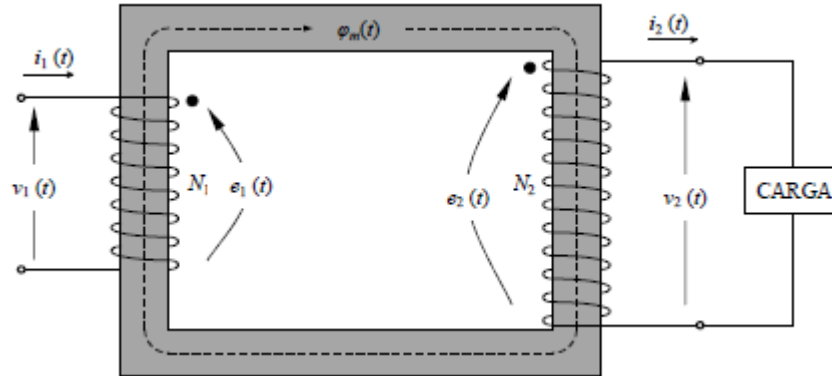
### **2.2 TRANSFORMADOR IDEAL**

Para demonstrar o funcionamento de um transformador ideal, será utilizado como exemplo um transformador ideal de dois enrolamentos (primário e secundário), como mostra a Figura 1. No entanto, um transformador pode possuir mais que dois enrolamentos acoplados pelo fluxo magnético (NOGUEIRA e ALVES, 2009).

Um transformador é ideal quando as perdas resultantes de sua operação em regime permanente podem ser desprezadas. Ou seja, as resistências presentes nos enrolamentos são ínfimas e o fluxo magnético produzido é totalmente confinado no núcleo, concatenando-se com os enrolamentos. No entanto, essas condições são



apenas considerações práticas, jamais sendo atingidas no caso do transformador real (NOGUEIRA e ALVES, 2009).



**Figura 1: Transformador ideal**

**Fonte: CHAPMAN, Stephen J. Electric Machinery Fundamentals**

Ao ser aplicada uma tensão  $v_1(t) = V_1 \text{sen}(\omega t)$  variante no tempo sobre o enrolamento primário do transformador, um fluxo magnético mútuo  $\varphi_m(t)$ , que também varia no tempo, irá passar pelo núcleo do mesmo, sendo seu valor determinado por:

$$\varphi_m(t) = \frac{V_1}{\omega N_1} \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

Onde:

$V_1$  – Amplitude da tensão aplicada no primário [V];

$N_1$  – Número de espiras do enrolamento primário;

$\omega$  – Frequência angular da tensão aplicada [rad/s].

Este fluxo se concatena com o primário, originando em seus terminais uma força eletromotriz (fem),  $e_1(t)$ , sendo que sua amplitude depende do número de espiras  $N_1$ , da amplitude do fluxo magnético  $\varphi_m(t)$  e da frequência. Segundo a Lei de Lenz, a fem  $e_1(t)$  irá se opor a tensão  $v_1(t)$ , de forma a anulá-la. De maneira análoga, o fluxo magnético também irá se concatenar com o enrolamento secundário, gerando

nos terminais do mesmo uma fem induzida  $e_2(t)$ , cuja amplitude depende do número de espiras  $N_2$ , da amplitude do fluxo  $\varphi_m(t)$  e da sua frequência.

As correntes  $i_1(t)$  e  $i_2(t)$  irão possuir direções opostas entre si, fato consequente da Lei de Lenz, uma vez que  $i_1(t)$  produz  $\varphi_m(t)$ , o qual produz  $i_2(t)$  e, portanto, que tentará anular  $i_1(t)$ .

De acordo com a Lei de Faraday, para o transformador ideal, pode-se dizer que

$$e_1(t) = \frac{d\lambda_1(t)}{dt} = N_1 \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Onde:

$\lambda_1(t)$  – Fluxo concatenado com o enrolamento primário (weber-espiras).

Como para este caso as perdas do núcleo são desconsideradas, tem-se então que  $v_1(t) = e_1(t)$ .

Considera-se agora uma tensão aplicada ao primário, que seja  $e_1(t) = E_1 \sin(\omega t) = \sqrt{2}E_1^{RMS} \sin(2\pi f t)$ . A partir dessa tensão pode-se deduzir que:

$$\varphi_m(t) \frac{1}{N_1} \int e_1(t) dt = \frac{\sqrt{2}E_1^{RMS}}{N_1} \int \sin(2\pi f t) dt \quad (2.3)$$

$$\varphi_m(t) = -\frac{\sqrt{2}E_1^{RMS}}{2\pi f N_1} \cos(2\pi f t) dt \quad (2.4)$$

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}E_1^{RMS}}{2\pi f N_1} \quad (2.5)$$

Onde:

$\Phi_m$  – Amplitude de fluxo magnético  $\varphi_m(t)$ ;

$E_1^{RMS}$  – Valor eficaz de  $e_1(t)$ .

Por meio dessa dedução, é possível concluir que o valor eficaz da tensão  $e_1(t)$  é

$$E_1^{RMS} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \Phi_m \quad (2.6)$$

Esta última, é a equação fundamental para a tensão induzida. Por meio dela que se conclui que a tensão eficaz induzida é diretamente proporcional à amplitude do fluxo magnético mútuo, à quantidade de espiras do enrolamento e à frequência (NOGUEIRA e ALVES, 2009). Também é possível concluir que a frequência sempre se mantém constante, a menos que seja feita uma alteração das tensões aplicadas no primário e induzida no secundário.

Para o secundário, todas essas conclusões também são válidas. Logo, tem-se que:

$$v_2(t) = e_2(t) = \frac{d\lambda_2(t)}{dt} = N_2 \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Relacionando e simplificando as Equações. (2.2) e (2.7), tem-se que

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.8)$$

A Equação (2.8) é uma relação entre as tensões de entrada e saída com o número de espiras de ambos os enrolamentos do transformador, onde  $\alpha$  representa a relação de transformação. Vale observar que para o caso do transformador ideal,

essa relação depende exclusivamente da razão entre o número de espiras dos enrolamentos (NOGUEIRA e ALVES, 2009).

Uma vez que as perdas do núcleo são nulas, tem-se que a potência de entrada será a mesma que a potência de saída, ou seja

$$v_1(t)i_1(t) = v_2(t)i_2(t) \quad (2.9)$$

Reformulando a Equação (2.9) e a substituindo na Equação (2.8), conclui-se que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \alpha = \frac{i_2(t)}{i_1(t)} \quad (2.10)$$

Reescrevendo as Equações (2.8) e (2.10) na forma fasorial e efetuando a respectiva divisão, tem-se:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{\dot{V}_2}{\dot{I}_2} = \alpha^2 Z_2 \quad (2.11)$$

na qual,  $Z_2$  é a impedância complexa da carga conectada ao secundário e que pode ser trocada pela impedância  $Z_1$  conectada ao primário, de modo a não ocorrer mudança no comportamento do circuito. A isto denomina-se referir a impedância ao outro lado do transformador, e é muito útil na simplificação e solução de circuitos envolvendo transformadores (NOGUEIRA; ALVES, 2009). Desta forma, calcula-se a impedância da carga  $Z_2$  relacionada ao primário:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\dot{V}_1 \dot{I}_2}{\dot{I}_1 \dot{V}_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \therefore Z_1 = \alpha^2 Z_2 \quad (2.12)$$

Por meio das Equações 2.8, 2.10 e 2.12, nota-se que a transformação de tensão ocorre especificamente em razão da relação entre o número de espiras dos enrolamentos, enquanto a transformação de corrente acontece de forma inversa. Importante observar também que as impedâncias são referidas ao primário na razão

direta ao quadrado e as potências ativa e aparente não se alteram (NOGUEIRA e ALVES, 2009).

### 2.3 TRANSFORMADOR REAL

Nesta seção será feita uma análise do transformador real, sem entrar em todos os detalhes sobre sua operação. Será abordada a teoria fundamental sobre seu funcionamento e o circuito equivalente, com foco nas correntes de magnetização e excitação, que são o ponto principal para o desenvolvimento deste trabalho.

Assim como na análise do transformador ideal, para o transformador real também é utilizado como exemplo uma máquina composta por dois enrolamentos. Ao observar a Figura 2, é possível identificar três diferentes fluxos magnéticos: o fluxo mútuo,  $\varphi_m(t)$ , e os fluxos de dispersão do enrolamento primário e secundário,  $\varphi_{D1}(t)$  e  $\varphi_{D2}(t)$ , respectivamente.

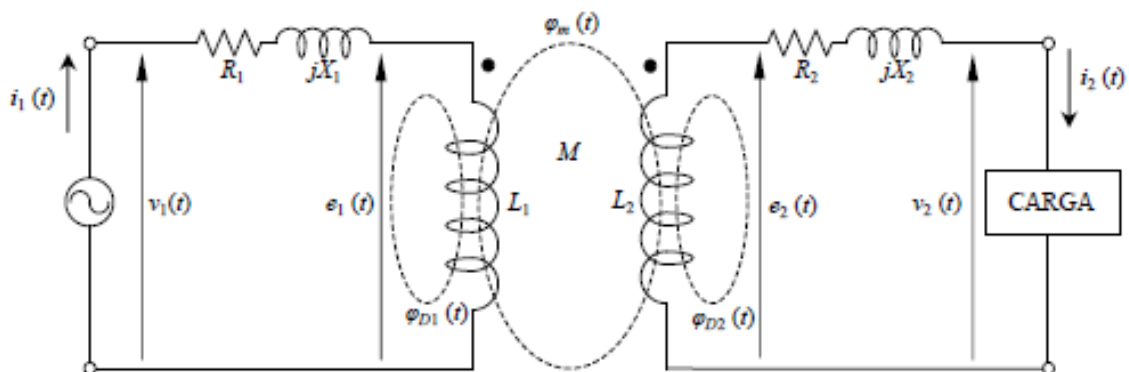


Figura 2: Transformador real

Fonte: KOSOW, Irwin L. Máquinas elétricas e transformadores.

O fluxo concatenado total presente junto ao enrolamento primário pode ser dividido em duas componentes, o fluxo mútuo  $\varphi_m(t)$  e o fluxo de dispersão  $\varphi_{D1}(t)$ . O fluxo mútuo se encontra confinado no núcleo e concatena com ambos os enrolamentos, enquanto que o fluxo de dispersão concatena apenas com o primário do transformador. Logo, o fluxo resultante pode ser definido por:

$$\varphi_1(t) = \varphi_m(t) + \varphi_{D1}(t) \quad (2.13)$$

Seguindo a Lei de Lenz e por consequência do fluxo total  $\varphi_1(t)$ , uma tensão  $e_1(t)$  é induzida no enrolamento primário, a qual resulta da combinação entre as tensões induzidas  $e_{m1}(t)$  e  $e_{D1}(t)$ , portanto:

$$e_1(t) = e_{m1}(t) + e_{D1}(t) \quad (2.14)$$

Dessa forma, baseando-se nas Equações (2.2) e (2.14), para o caso do transformador real, pode-se deduzir que:

$$e_1(t) = \frac{d\lambda_1(t)}{dt} = N_1 \frac{d\varphi_1(t)}{dt} = N_1 \left( \frac{d\varphi_m(t)}{dt} + \frac{d\varphi_{D1}(t)}{dt} \right) \quad (2.15)$$

$$e_2(t) = \frac{d\lambda_2(t)}{dt} = N_2 \frac{d\varphi_2(t)}{dt} = N_2 \left( \frac{d\varphi_m(t)}{dt} + \frac{d\varphi_{D2}(t)}{dt} \right) \quad (2.16)$$

Comparando-se as Equações (2.15) e (2.16) com a Equação (2.14), pode-se concluir que

$$e_{m1}(t) = N_1 \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \quad (2.17)$$

$$e_{D1}(t) = N_1 \frac{d\varphi_{D1}(t)}{dt} \quad (2.18)$$

$$e_{m2}(t) = N_2 \frac{d\varphi_m(t)}{dt} \quad (2.19)$$

$$e_{D2}(t) = N_2 \frac{d\varphi_{D2}(t)}{dt} \quad (2.20)$$

Observando-se as Equações (2.17) e (2.19), nota-se que as tensões  $e_{m1}(t)$  e  $e_{m2}(t)$  induzidas nos enrolamentos devido ao fluxo mútuo são diretamente proporcionais ao número de espiras de cada enrolamento, de maneira que a razão entre essas tensões pode ser calculada da seguinte forma:

$$\frac{e_{m1}(t)}{e_{m2}(t)} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.21)$$

Razão esta que é igual a demonstrada para o transformador ideal. Como em um transformador bem projetado  $e_{m1}(t) \gg e_{D1}(t)$  e  $e_{m2}(t) \gg e_{D2}(t)$ , a relação de transformação do transformador é aproximadamente:

$$\frac{e_1(t)}{e_2(t)} \approx \frac{e_{m1}(t)}{e_{m2}(t)} \approx \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.22)$$

Quanto menor forem os fluxos de dispersão do transformador, mais próximo será a relação de transformação do transformador real ao do transformador ideal.

## 2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE

É possível construir um circuito equivalente que leve em consideração todas as principais imperfeições existentes em um transformador real. Cada imperfeição deve ser considerada separadamente e seus efeitos são incluídos no modelo do mesmo.

O principal tipo de imperfeição são as perdas, porém para se obter o modelo apresentado na Figura 6, outras considerações precisam ser feitas. A primeira consideração é que os fluxos dispersos  $\varphi_{D1}$  e  $\varphi_{D2}$ , são simulados por reatâncias  $X_1$  e  $X_2$  no primário e no secundário, de modo que as quedas de tensão nessas reatâncias são numericamente iguais as parcelas de força eletromotriz induzida pelos respectivos fluxos de dispersão (SAMBAQUI, 2008). A segunda consideração é que ambos os enrolamentos apresentam resistências  $R_1$  e  $R_2$ .

Referindo-se as grandezas do lado secundário ao primário, obtém-se o circuito da Figura 3.

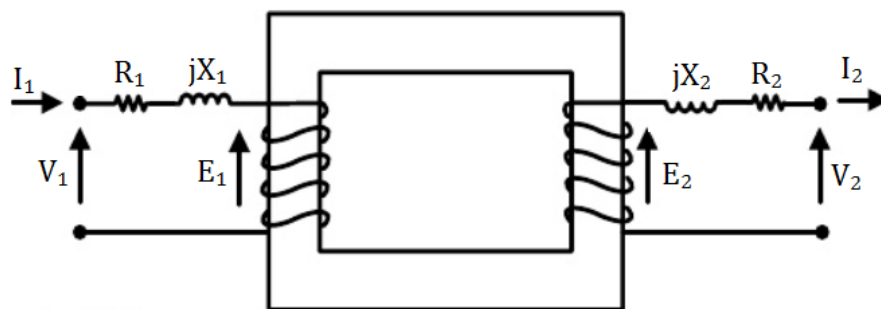


Figura 3: Circuito com grandezas referidas.

Fonte: SAMBAQUI (2008).

As perdas no ferro, também conhecida como perdas no núcleo, podem ser representadas por uma resistência, conhecida por resistência de perdas no ferro, em paralelo com a força eletromotriz induzida pelo fluxo mútuo (Figura 4). Essa resistência, ao ser percorrida por uma corrente, dissipa as perdas no núcleo  $P_o$ , que pode ser calculado por:



$$P_O = P_H + P_F \quad (2.23)$$

Onde:

$P_H$  – Perdas por histerese;

$P_F$  – Perdas por Foucault.

Sendo que as perdas por histerese e por Foucault são encontradas da seguinte forma:

$$P_H = K_s B_m^{1,6} f \quad (2.24)$$

$$P_F = 2,2 f^2 B_m^2 d^2 10^{-3} \quad (2.25)$$

De modo que:

$K_s$ - Coeficiente de Steimmetz;

$B_m$ - Indução máxima no núcleo [T];

$f$ - Frequência [Hz];

$d$  – Espessura da chama [mm].

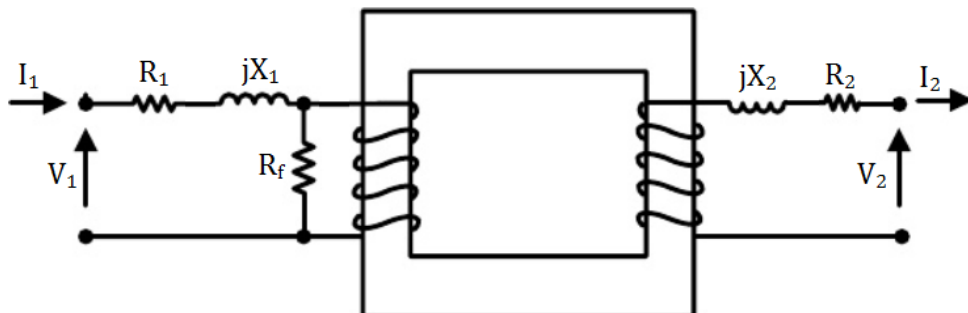


Figura 4: Circuito com a resistência de perda no ferro referida.

Fonte: SAMBAQUI (2008).

O efeito da permeabilidade finita do fluxo ferromagnético é representado ao se introduzir uma reatância indutiva em paralelo com a força eletromotriz induzida, por

meio da qual flui a corrente de excitação  $I_0$  (SAMBAQUI, 2008). Essa reatância é mostrada na Figura 5 e é denominada reatância de magnetização do transformador.

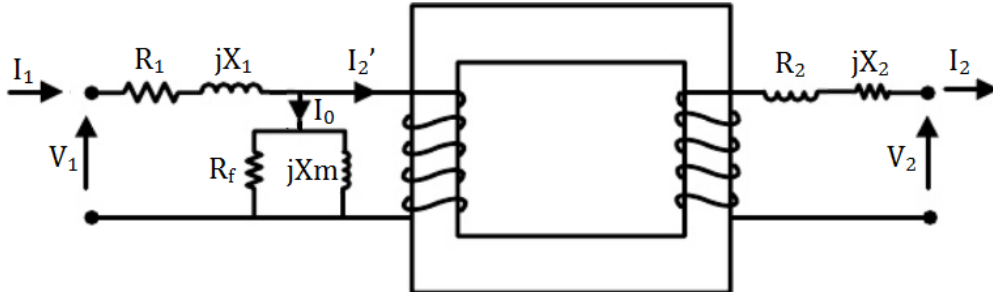


Figura 5: Circuito com reatância de magnetização referida.

Fonte: SAMBAQUI (2008).

Dessa maneira o circuito equivalente completo é representado pela Figura 6.

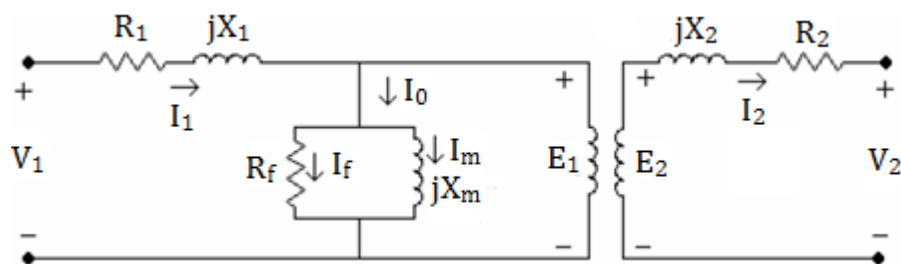


Figura 6: Circuito equivalente completo

Fonte: Adaptador de NASAR (1998).

## 2.5 CORRENTE DE EXCITAÇÃO

A corrente de excitação, também conhecida como corrente em vazio  $I_0$ , tem a função de suprir as perdas do núcleo e de produzir o fluxo magnético mútuo  $\phi_m$ . Conceituando estes aspectos, subdivide-se essa corrente em duas outras, dessa forma tem-se a corrente ativa ou de perdas  $I_p$  e a corrente magnetizante ou reativa  $I_r$ , e  $I_p$  é a responsável pelas perdas no núcleo e está em fase com a tensão aplicada sobre o transformador primário  $V_1$ , enquanto que  $I_r$  é responsável pela criação do fluxo

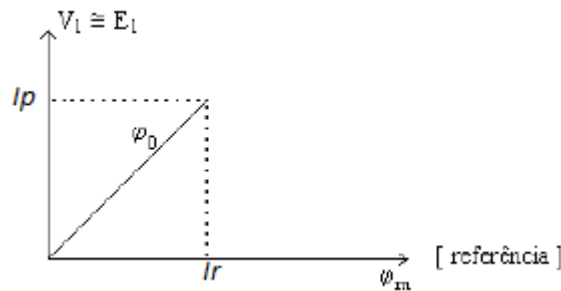
mútuo e se encontra  $90^\circ$  atrasada em relação a tensão aplicada ao primário (LISITA, 2000).

Segundo o Gráfico 1, o qual mostra a corrente de magnetização em relação à tensão do transformador, é possível concluir que:

$$I_0 = \sqrt{I_p^2 + I_r^2} \quad (2.26)$$

$$I_p = I_0 \cos \varphi_0 \quad (2.27)$$

$$I_r = I_0 \sin \varphi_0 \quad (2.28)$$



**Gráfico 1: Corrente de magnetização x Tensão aplicada**

**Fonte: LISITA, Luiz R. Conversão eletromecânica de energia (2000).**

Sendo que a perda em vazio pode ser determinada por:

$$P_0 = V_1 I_0 \cos \varphi_0 = V_1 P_1 \quad (2.29)$$

Onde  $\varphi_0$  é a defasagem entre a tensão  $V_1$  e a corrente  $I_0$ .

Para que o transformador tenha um comportamento mais próximo possível de um transformador ideal, é importante que as perdas sejam mínimas. Desse modo, a corrente de excitação deve ser praticamente toda usada para a magnetização do

núcleo, ou seja,  $I_r \gg I_p$ . Com isso o valor de  $\varphi_0$  será o maior possível para que  $\cos \varphi_0$  possua valores baixos (LISITA, 2000).

Outra corrente, e também importante para a compreensão desse trabalho e que será detalhada a seguir, é a corrente de magnetização.

## 2.6 CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO

O fluxo magnético dos transformadores é mantido pela circulação constante da corrente elétrica, sendo esta a corrente de magnetização no enrolamento primário. Como as propriedades magnéticas do circuito magnético do transformador possuem um caráter não linear, a forma de onda da corrente de magnetização é não sinusoidal.

Por conta dessa não linearidade, algumas aproximações para a determinação da  $I_0$  tornam-se necessárias. Para isso será necessário uma solução particular e uma solução complementar, sendo que a particular é referente ao regime permanente e a complementar é referente ao termo transitório (LISITA, 2000).

Por meio do termo transitório, pode-se constatar um fenômeno que mostra o surgimento de uma grande corrente transitória de magnetização ao se conectar um transformador à rede, cujo efeito é causar por um tempo momentâneo uma queda de tensão da alimentação e, provavelmente, uma atuação de relés instantâneos. O valor de  $I_0$  atingido nesse regime transitório depende do ponto do ciclo de tensão e das condições magnéticas do núcleo (LISITA, 2000).

Seja o circuito da Figura 6, representando um transformador a vazio, no qual foi aplicada a Lei de Kirchhoff na primeira malha, pode-se obter:

$$V_1 = r_1 I_0 + L_1 \frac{dI_0}{dt'} + N_1 \frac{d\varphi'}{dt'} \quad (2.30)$$

Supondo-se, como parte das aproximações, que os dois primeiros termos da Equação (2.30) são desprezados e que no início do processo de energização a

tensão da fonte passa por um valor  $V_{1m} \sin \alpha$ , no qual  $\alpha$  é um ângulo qualquer, obtém-se:

$$V_1 = V_{1m} \sin(\omega t + \alpha) = N_1 \frac{d\phi'}{dt'} \quad (2.31)$$

Integrando a equação acima e sabendo-se que  $\frac{V_{1m}}{N_1 \omega} = \phi_m$ , tem-se:

$$\phi = \phi_0 + \phi_m \cos \alpha - \phi_m \cos(\omega t + \alpha) \quad (2.32)$$

Onde:

$\phi_0 + \phi_m \cos \alpha$  – Amortecimento para os casos reais;

$\phi_m \cos(\omega t + \alpha)$  – Regime permanente.

Supondo-se que  $\phi_0 = 0,27\phi_m$  e  $\alpha = 64^\circ$ , a Equação (2.32) torna-se  $\phi_{pico} = 1,71\phi_m$ . Por conta desse alto valor de pico e uma vez que o fluxo deve ser produzido por  $I_0$ , conclui-se que a relação  $\phi = f(I_0)$  necessita de um grande valor de corrente grande nos primeiros instantes.

## 2.7 IMPEDÂNCIA

A impedância, também conhecida como tensão de curto-circuito, tem como base a tensão nominal do enrolamento do transformador e é obtida entre os terminais

do enrolamento quando circula sobre ele uma corrente correspondente à nominal. Ela pode ser expressa por:

$$Z_{\%} = \frac{V_{CC}}{V_N} 100 \quad (2.33)$$

A impedância é geralmente expressa em porcentagem onde  $V_{CC}$  é a tensão de curto circuito e  $V_N$  é a tensão nominal (FINOCCHIO, 2010).

## 2.8 TIPOS DE NÚCLEO

São existentes 4 (quatro) tipos de núcleo: o núcleo do tipo de grão orientado, núcleo de metal amorfo, flecha e *step-lap*. Atualmente, o núcleo de grão orientado é o mais utilizado para a fabricação de transformadores, e é também o tipo utilizado nos transformadores cujos dados serão analisados neste trabalho.

Este tipo de núcleo foi criado nos meados de 1934 pelo metalurgista Norman Goss, que desenvolveu uma liga de aço-silício, com uma permeabilidade superior à de outros materiais utilizados, a qual passou a ser nomeada de aço-silício de grão orientado. Esta liga contém direções muito favoráveis de magnetização, que a fez ser atrativa para a construção de núcleo de transformadores, já que a permeabilidade no sentido da laminação é muito alta, o que oferece baixa resistência à passagem do fluxo magnético (GEROMEL, 2003).

A razão dessa alta direcionalidade magnética está na “estrutura atômica cúbica de corpo centrado dos cristais da liga de silício e ferro”, o que significa que os átomos da liga estão organizados em cubos. Por meio de técnicas de fabricação adequadas, pode-se alinhar a maior parte das arestas no sentido da laminação (FITZGERALD, 2006).

## 2.9 TIPOS DE AÇOS

Os aços elétricos são os materiais magnéticos mais utilizados nos núcleos de máquinas elétricas, sendo estes divididos em aço com baixo teor de carbono, aço de grão orientado e o aço de grão não orientado. Como já foi escrito anteriormente, o aço de grão orientado também é conhecido como aço silicioso. A seguir serão

detalhadas essas classificações, de modo que será possível observar a qualidade das suas propriedades magnéticas e o respectivo custo de fabricação.

### **2.9.1 AÇO DE BAIXO TEOR DE CARBONO**

O aço de baixo carbono foi o tipo usado nos primeiros transformadores fabricados em 1880, porém na atualidade não são mais usados na construção de equipamentos elétricos de potência, e sim na fabricação de pequenos motores nos quais as partes magnéticas não são importantes. Este tipo de aço contém algumas impurezas indesejadas do carbono, sendo a principal delas a cementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) (CULLITY e GRAHAM, 2009).

### **2.9.2 AÇOS DE GRÃO ORIENTADO**

A descoberta do aço de grão orientado ocorreu em 1933 por Norman P. Goss, época no qual este tipo de aço era laminado a quente (CULLITY e GRAHAM, 2009). Anos depois foi observado que na laminação do aço a frio, com recozimentos intermediários, com a temperatura variando entre  $900^\circ\text{C}$  e  $1100^\circ\text{C}$  (MOSES, 1990), e tendo seu processo finalizado com um último recozimento à temperatura de  $1200^\circ\text{C}$ , as chapas adquiriam propriedades magnéticas relativamente superiores em comparação com a laminação a quente. Essa melhoria é devido a uma recristalização secundária que ocorria durante o recozimento com temperatura elevada, o qual conduzia à obtenção de uma textura magneticamente favorável. As chapas de grão orientado foram inseridas no mercado apenas 20 anos depois da sua descoberta e, apesar dessa melhoria descoberta, ainda se procura explorar ainda mais as suas propriedades (CULLITY e GRAHAM, 2009).

Em 1965 a *Nippon Steel Corporation* foi capaz de produzir um novo tipo de aço que foi denominado por aço de grão orientado de alta permeabilidade. Para isso é adicionado 0,025% de alumínio ao aço fundido para melhorar a orientação da textura Goss. Porém, apesar da melhor orientação, o produto passou a ter um tamanho maior médio de grão de cerca de 1cm de diâmetro, o que fez com que as perdas dinâmicas do material aumentassem.

Atualmente, as chapas possuem um teor de silício de 2,2% a 3,2%, sendo que as chapas são fabricadas com espessuras de no máximo 0,35mm, com o

tamanho médio do grão sendo 0,5mm de diâmetro, ou seja, há apenas um grão na espessura da chapa. Esse tipo de aço é o mais utilizado nos transformadores por se privilegiar uma direção preferencial de magnetização (LANDGRAF, 2012).

## **2.10 COMPONENTES CONSTRUTIVOS**

Os transformadores em geral são formados por duas partes principais, a parte ativa e os acessórios complementares.

### **2.10.1 PARTE ATIVA**

A parte ativa é constituída pelos enrolamentos e pelo núcleo ferromagnético. Os enrolamentos são em grande parte feitos de fio de cobre isolado com esmalte ou papel. Geralmente os enrolamentos de baixa e alta tensão são concêntricos, sendo que o de baixa tensão ocupa a parte interna e a alta a parte externa. Para facilitar a manutenção e a retirada de derivações para conexão ao comutador, os enrolamentos são divididos em bobinas de menor número de espiras.

Quanto ao núcleo, este é constituído por lâminas feitas de material ferromagnético, normalmente composto por silício, que possui ótimas características de magnetização e baixas perdas por histerese. As lâminas são isoladas entre si e do núcleo, de modo que o seu empilhamento diminui a ação das correntes parasitas que surgem por conta da variação de fluxo que surge sobre o material condutor (SERAFIM, 2009).

### **2.10.2 ACESSÓRIOS COMPLEMENTARES**

Chama-se de acessórios complementares o tanque, as buchas, os radiadores, o comutador e a placa de identificação do transformador, todos estes ilustrados na Figura 7.

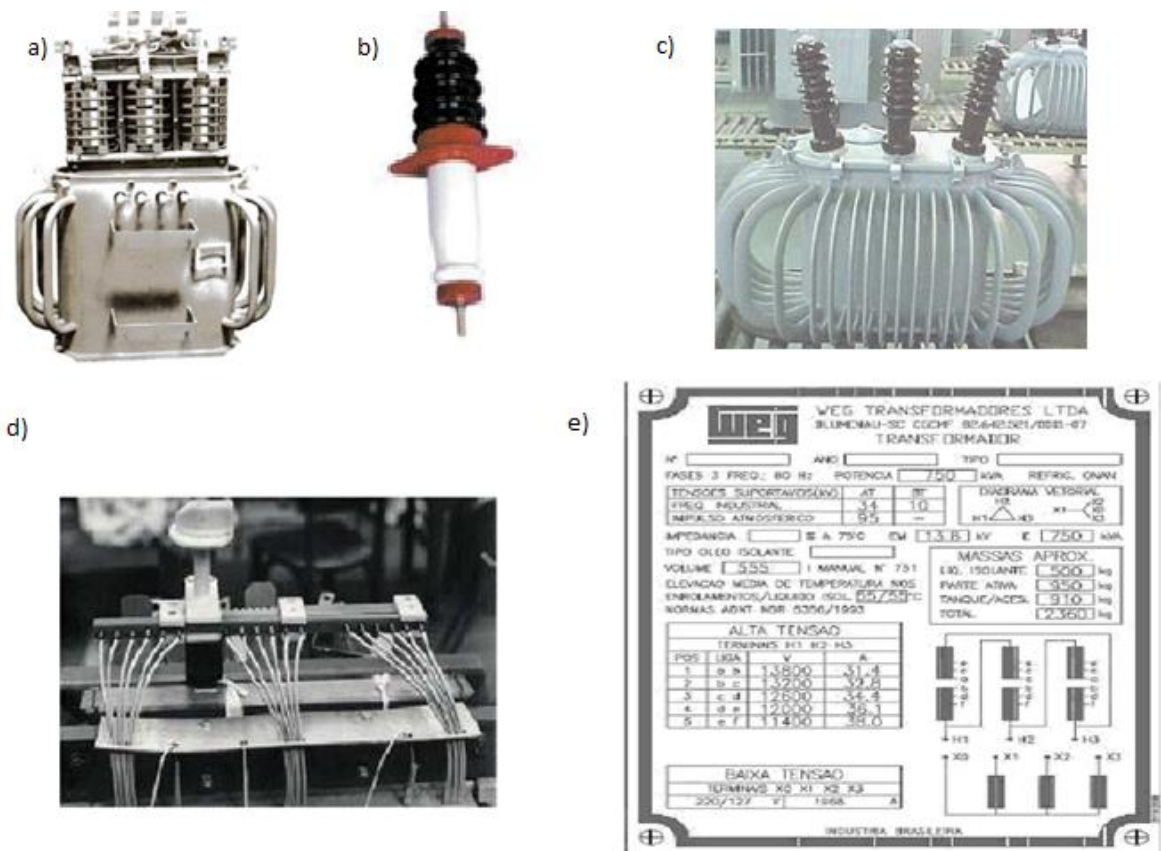
O tanque, tem a função de revestir a parte ativa e o recipiente do líquido isolante e é composto por diversos outros equipamentos e acessórios, como tampa de inspeção, visor de nível de óleo, conector de aterramento, dentre outros.

As buchas são feitas de porcelana e possuem o objetivo de isolar os terminais das bobinas do tanque do transformador. Já os radiadores são instalados



na parte externa do tanque e são responsáveis pela circulação do óleo isolante por meio das suas aletas, as quais ficam em contato com o ambiente externo permitindo que a temperatura do óleo diminua.

O comutador é um mecanismo que permite a variação do número de espiras dos enrolamentos de alta tensão com a finalidade de corrigir o desnível de tensão existente na rede de distribuição, a qual se deve à queda de tensão ocorrida ao longo da mesma.



**Figura 7: Acessórios complementares. a) tanque do transformador; b) bucha; c) radiador do transformador; d) comutador; e) placa de identificação.**

**Adaptado: Neves, Munchow (2011).**

A placa de identificação, que é feita de alumínio ou aço inoxidável e contém todas as especificações e informações construtivas da máquina elétrica. Entre as informações deve-se constar o nome e os dados do fabricante, numeração da placa, indicação da NBR, a potência em kVA, impedância equivalente em percentual, as tensões nominais de baixa e alta tensão, tipo de óleo isolante, diagrama das ligações, diagrama fasorial, massa total e o volume total do líquido.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Nesta seção serão apresentados os métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, os quais se separam em dois tipos: o método de ensaio e o método de análises estatísticas. No primeiro, é mostrado como se obter as correntes do núcleo, as quais serão então analisadas pelo método estatístico.

#### 3.1 MÉTODO DE ENSAIO

Inicialmente deve-se determinar, para que se possa analisar a corrente de excitação e magnetização que circulam pelo núcleo, as perdas. Estas perdas podem ser encontradas com a execução de um ensaio a vazio, como mostra a Figura 8, com o transformador em circuito aberto na alta tensão. A maneira mais segura e usual de fazer isso é por meio do enrolamento de menor tensão existente (KOSOW, 2005). Neste tipo de teste, a queda de tensão na impedância de dispersão, gerada pela corrente de excitação, é geralmente desprezível (DELTORO, 1999).

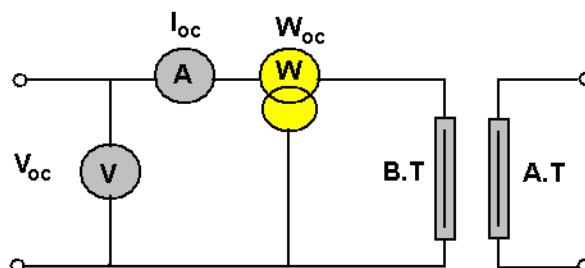


Figura 8: Ensaio a vazio.

Fonte: Autoria própria.

É importante notar que as grandezas envolvidas devem ser medidas do lado de baixa tensão (BT). Para dar início aos cálculos das perdas, uma série de equações precisam ser relacionadas, começando pela Equação (3.1), que representa a corrente no ferro  $I_f$ .

$$I_f = \frac{V_1}{R_p} \quad (3.1)$$

Onde:

$V_1$  – Tensão do primário;

$R_f$  – Resistência no ferro.

Em seguida, tem-se a corrente de magnetização que passa pela reatância correspondente.

$$I_m = \frac{V_1}{jX_m} \quad (3.2)$$

Em sequência, apresenta-se a perda de potência no núcleo através da multiplicação da tensão e da corrente do enrolamento primário, e do cosseno do ângulo de defasagem entre as mesmas.

$$W_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_0 \quad (3.3)$$

Ao isolar o cosseno do ângulo de defasagem tem-se o fator de potência da seguinte maneira:

$$\cos \varphi_0 = \frac{W_1}{V_1 I_1} \quad (3.4)$$

As Equações (3.5) e (3.6) são possíveis alternativas para as correntes do núcleo e do ramo de magnetização:

$$I_f = I_1 \cos \varphi_0 \quad (3.5)$$

$$I_m = I_1 \sin \varphi_0 \quad (3.6)$$

Da mesma forma, as Equações (3.7) e (3.8) são possíveis alternativas para a reatância de magnetização e a resistência do núcleo:

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} \quad (3.7)$$

$$R_f = \frac{V_1}{I_f} \quad (3.8)$$

## 3.2 MÉTODO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise das características das amostras dos núcleos dos transformadores será realizada com o uso de ferramentas estatísticas. A estatística consiste em uma ciência que se preocupa com a coleta, organização, análise e interpretação de dados experimentais, visando à tomada de decisões (LARSON; FARBER, 2009). Para melhor compreender como esse estudo funciona é fundamental saber a definição de dois conceitos, população e amostra. A população é o conjunto de elementos delimitados por uma determinada característica em comum. Por sua vez, a amostra é um subconjunto da população, cujos elementos serão examinados para efeito do estudo estatístico (COSTA NETO, 2002).

Logo, o objetivo da análise estatística se baseia no acúmulo de hipóteses a partir da população de origem, ou seja, partindo de uma amostra. É a partir daí que se tem a definição da estatística indutiva, cuja interpretação de uma determinada população induz conclusões de um todo. No entanto, este processo intuitivo está relacionado a uma margem de incerteza, de modo que os resultados obtidos não são absolutamente exatos. Por conta disso, o uso das técnicas de medidas de tendência central e dispersão são indispensáveis (FALCO, 2008).

### 3.2.1 MEDIDAS DE TENDÊNCIA CENTRAL

As medidas de tendência central formam um grupo de ferramentas que visam à descrição de grupos como um todo, ou seja, esta qualificação deve sintetizar da melhor maneira possível o comportamento do conjunto do qual ele é originário. No entanto, os dados estudados podem não apresentar uma estimativa satisfatória, por conta disso, faz-se uso da média, mediana e moda como medidas de tendência central para delimitar os dados em torno dos valores centrais.

A média aritmética é calculada a partir da somatória dos valores de entrada dividida pelo número da mesma e é representada pelo símbolo  $\bar{x}$  ("x barra") quando referida a média amostral e  $\mu$  quando relacionada a média populacional (LARSON; FARBER, 2009). Este tipo de média é a mais utilizada na matemática e essencial neste estudo em particular e, devido a isso, pode conduzir a erros de interpretação, pois ela é sensível a cada um dos valores do conjunto em questão (ROSSETTI et al., 2008). Desse modo, deve-se atentar a valores discrepantes e isolados, pois estes

podem influenciar relativamente no valor da média (LARSON; FARBER, 2009). Para este trabalho, a média serão os principais valores utilizados, sendo que os outros serão estudados apenas para dar base e confirmar os mesmos.

Fica aconselhável então, a aplicação da mediana (*md*), a qual divide o conjunto, organizado em ordem crescente, em duas partes iguais. Ou seja, 50% dos elementos do caso analisado devem estar abaixo da mediana e outros 50% devem estar acima dessa medida. Caso o número de observações seja par, a mediana será a média dos dois valores centrais (ROSSETTI et al., 2008).

A moda, última medida de tendência central, traduz o valor do conjunto que repete com mais frequência (FALCO, 2008), sendo útil na mensuração de variáveis quantitativas discretas. As variáveis discretas traduzem valores que formam um conjunto finito de números, normalmente inteiros. No entanto, as variáveis também podem ser contínuas, as quais podem assumir qualquer valor pertencente ao intervalo dos números reais. Dessa maneira, seja a variável discreta ou contínua, deve-se realizar procedimentos adequados para sintetizar as informações, pois para um estudo estatístico, não faz sentido fazer uso de uma informação não analisada matematicamente (ROSSETTI et al., 2008).

### 3.2.2 MEDIDAS DE DISPERSÃO E ERRO RELATIVO

As medidas de dispersão mais conhecidas são a amplitude total, variância e desvio padrão. Elas são utilizadas para medir a dispersão ou o grau de variabilidade dos valores em torno da média aritmética e a representatividade da média, evidenciando o nível de homogeneidade e heterogeneidade dentro de cada grupo analisado (FALCO, 2008).

A amplitude é a medida mais simples de variabilidade, ela é a diferença entre o valor máximo e mínimo de uma população ou amostra. Entretanto, por se considerar apenas os valores extremos, faz com que essa medida possa ter resultados infielis, pois os valores podem ser discrepantes, de forma que o resultado final seja incoerente (ROSSETTI et al., 2008). Apesar disso, esta medida contribui na determinação do nível de credibilidade e uniformidade dos dados da amostra, de modo a sugerir deduções que colaborem na confiabilidade da pesquisa.

A variância e desvio-padrão se baseiam em desvios dos valores de um conjunto de dados relacionados à média. Porém, como a soma dos desvios simples

em relação a média é nula, é preciso trabalhar com os desvios quadráticos, pois estes consideram um desvio negativo igual a um positivo de mesma magnitude. Logo, a variância é a média dos desvios quadráticos em torno da média (Equação 3.8), aonde  $S^2$  é a variância amostral, enquanto que para uma população a variância é  $\sigma^2$ . Os termos  $x_i$  e  $\bar{x}$  são o valor da amostra e da média aritmética, respectivamente.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.8)$$

Essa equação, em certos casos, pode ser vista de modo diferente ao mostrado neste trabalho. Quando se trata de uma população, o divisor  $n - 1$  é substituído por  $n$ , pois neste caso há um grande número de indivíduos, fazendo com que a diferença de um elemento seja insignificante (BUSSAB; MORETIN, 2011).

Uma vez determinada a variância, pode-se facilmente encontrar o desvio padrão, a qual é a raiz quadrada positiva da variância, é representada por  $S$  para amostras e por  $\sigma$  para populações (LARSON; FARBER, 2009).

Quanto ao erro relativo, ele permite a comparação entre uma estimativa e um valor real como uma porcentagem do valor real, o qual mostra o quão próximo, ou não, o valor estimado estava do valor exato. Para isso, faz-se uso da Equação (3.9).

$$E_{\%} = \frac{|I_m - I_r|}{I_r} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

Onde:

$E_{\%}$  - Erro relativo;

$I_m$  - Valor da corrente estimado ou medido;

$I_r$  - Valor da corrente real ou exato.

Neste trabalho dos dados analisados o erro relativo é o único que terá seus resultados apresentados, já que é o principal a mostrar a exatidão da proposta.

## 4 RESULTADOS

O escopo para a coleta de dados de uma pesquisa estatística deve ser profundamente estudado, uma vez que na maior parte dos casos, a análise detalhada de uma população corrobora-se irrealizável por conta do número de amostras. Por esta característica, optou-se por trabalhar com um grupo amostral de apenas 1500 transformadores a óleo. Ressalta-se que o grupo de elementos que será tratado não deve ser altamente reduzido, pois o resultado pode se tornar impreciso e de pouca confiança. Da mesma forma, é adequado também que o conjunto amostral não seja exageradamente grande, de modo que a análise não seja dispendiosa tanto do ponto de vista econômico quanto cronológico. Devido a isso, concluiu-se que 100 máquinas de transformação, para cada potência, seria um número adequado para este caso. Dessa forma, uma vez que o foco do trabalho consiste em definir e analisar estatisticamente as características das correntes de transformadores, de modo a definir as mesmas, acredita-se que essa porção de elementos seja adequada.

A classe de transformadores a óleo que foi utilizada para a coleta de dados possui potências de 15kVA até 3MVA e são todos fabricados pela Romagnole Ltda. Por motivos de objetividade, não será mostrado o resultado passo a passo de todo o estudo estatístico, e sim, o resultado final, que mostra o valor médio das correntes dos transformadores, e o erro relativo, para mostrar a exatidão dos valores estimados em relação aos medidos. A média foi efetuada depois da análise dos dados coletados, desde da análise dos valores máximos e mínimos até o desvio padrão e da margem de erro. A Tabela 1 mostra esses valores, sendo a primeira coluna a potência, nas colunas 2, 4, 5 e 6, os valores médios das correntes nominais, de excitação, magnetização e do ferro, respectivamente e, na coluna 3, a porcentagem da corrente de excitação em relação à corrente nominal. Para os transformadores com potência de 30kVA, por exemplo, tem-se os valores de aproximadamente 2,95 para a corrente de excitação, 1,56 para a corrente de magnetização e 1,39 para a correntes do ferro.

**Tabela 1 – Valores médios das correntes obtidas por análise estatística.**

<b>P [kVA]</b>	<b>I<sub>n</sub></b>	<b>I<sub>n%</sub></b>	<b>I<sub>o</sub></b>	<b>I<sub>m</sub></b>	<b>I<sub>f</sub></b>
<b>15</b>	39,36479	11,12409	4,378974	2,142326	2,236647
<b>30</b>	78,72958	3,746946	2,949955	1,556794	1,39316
<b>45</b>	118,0944	1,982585	2,341321	1,291587	1,049734
<b>75</b>	196,824	0,899102	1,749965	1,020799	0,729166
<b>112,5</b>	295,2359	0,470442	1,388913	0,846901	0,542012
<b>150</b>	393,6479	0,299478	1,178887	0,741798	0,437089
<b>225</b>	590,4719	0,15846	0,93566	0,615429	0,320231
<b>300</b>	787,2958	0,100874	0,794173	0,539053	0,255121
<b>500</b>	1312,16	0,045237	0,593586	0,426037	0,167549
<b>750</b>	1968,24	0,023936	0,471118	0,35346	0,117658
<b>1000</b>	2624,319	0,015237	0,399877	0,309595	0,090283
<b>1500</b>	3936,479	0,008062	0,317375	0,256854	0,060521
<b>2000</b>	5248,639	0,005132	0,269383	0,224977	0,044405
<b>2500</b>	6560,799	0,003616	0,237214	0,203003	0,034211
<b>3000</b>	7872,958	0,002716	0,213804	0,186651	0,027152

A Tabela 2 possui a mesma configuração da tabela anterior, no entanto nela são retratados os valores das correntes e das potências coletados por ensaios.

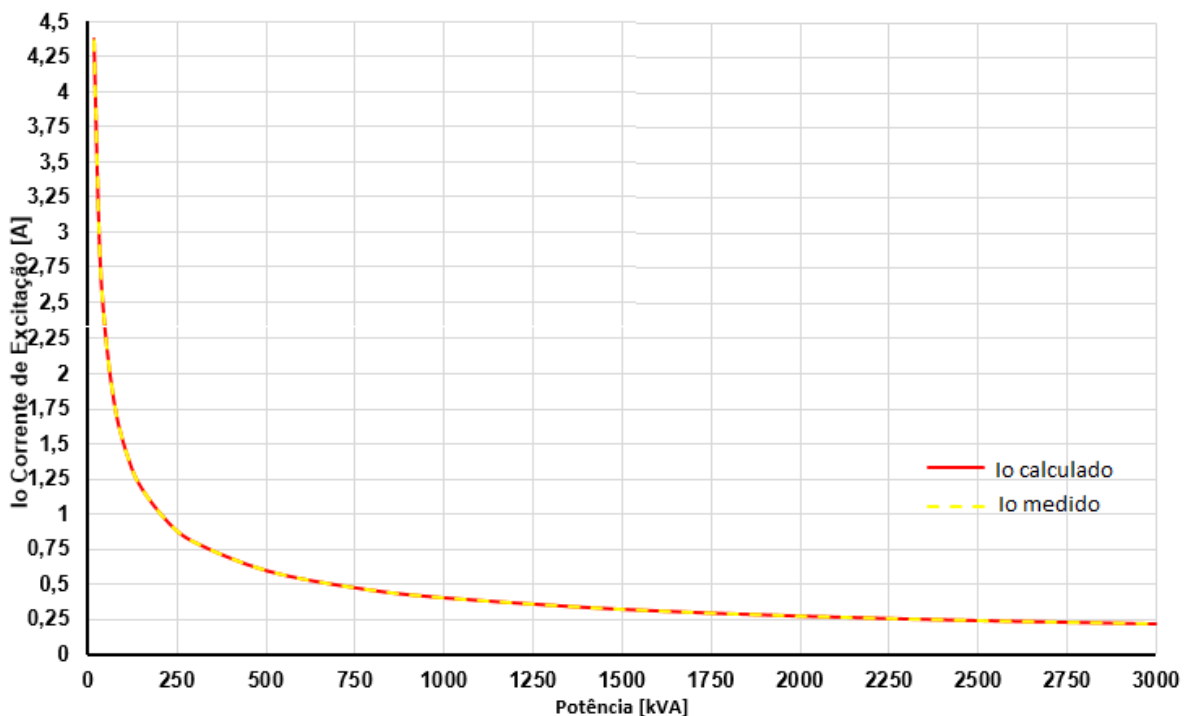
**Tabela 2 – Valores médios das correntes obtidas por meio do ensaio.**

<b>P [kVA]</b>	<b>I<sub>n</sub></b>	<b>I<sub>n%</sub></b>	<b>I<sub>o</sub></b>	<b>I<sub>m</sub></b>	<b>I<sub>f</sub></b>
15,06	39,52225	11,05459	4,369022	2,138391	2,230632
30,54	80,14671	3,643461	2,920114	1,544054	1,37606
45,27	118,8029	1,964053	2,333352	1,288033	1,04532
75,23	197,4275	0,884838	1,746914	1,01936	0,727554
112,58	295,1834	0,470573	1,389053	0,84697	0,542083
150,17	394,094	0,298946	1,178127	0,741411	0,436716
225,23	591,0755	0,158206	0,935115	0,61514	0,319976
300,45	788,4768	0,100636	0,793495	0,538681	0,254815
501,02	1314,837	0,045093	0,592897	0,425638	0,167259
750,31	1969,053	0,02392	0,471007	0,353393	0,117614
1001,12	2627,259	0,015211	0,399622	0,309435	0,090187
1500,86	3938,736	0,008055	0,317271	0,256786	0,060485
2000,43	5249,767	0,005131	0,26935	0,224955	0,044395
2501,85	6565,654	0,003611	0,237114	0,202934	0,034181
3000,17	7873,404	0,002715	0,213797	0,186647	0,02715



Neste caso, os valores medidos para os transformadores de 30kVA são de aproximadamente, 2,92 para a corrente de excitação, 1,54 para a corrente de magnetização e 1,38 para a corrente do ferro. Ao observar essas tabelas é possível notar que os valores obtidos pelos dois métodos são próximos. Essa análise está disposta por meio dos gráficos de 2 a 5, plotados por meio do programa Excel.

O gráfico 2 se refere a correntes de excitação.



**Gráfico 2: Valores da corrente de excitação x potência.**

**Fonte: Autoria própria.**

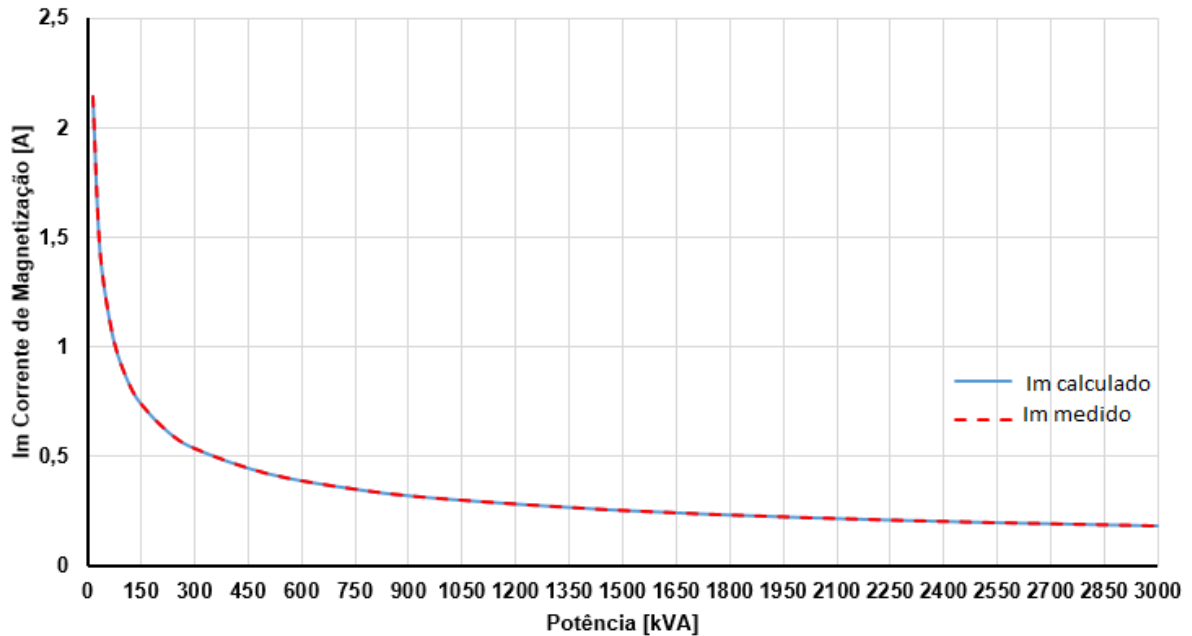
Como os valores obtidos estatisticamente e os obtidos por meio do ensaio são semelhantes, dificulta a distinção das curvas, (com uma praticamente sobre a outra), por este motivo, fez-se uso do tracejado para as curvas que representam os valores medidos. Por meio da curva referente ao valor calculado é possível obter a Equação (4.1), que assim como as Equações (4.2) e (4.3), também foi obtida por meio do programa Excel.

$$I_o = 20,494 \cdot S^{-0,57} \quad (4.1)$$

$I_o$ : corrente de excitação [A]

$S$ : potência em [kVA]

O gráfico 3 é referente a correntes de magnetização e, assim como no gráfico anterior, os valores são próximos o suficiente para que se observe praticamente apenas uma curva.



**Gráfico 3: Valores da corrente de magnetização x potência.**

**Fonte: Autoria própria.**

A Equação (4.2) obtida mediante este gráfico é:

$$I_m = 7,4575 \cdot S^{-0,461} \quad (4.2)$$

$I_m$ : corrente de magnetização [A]

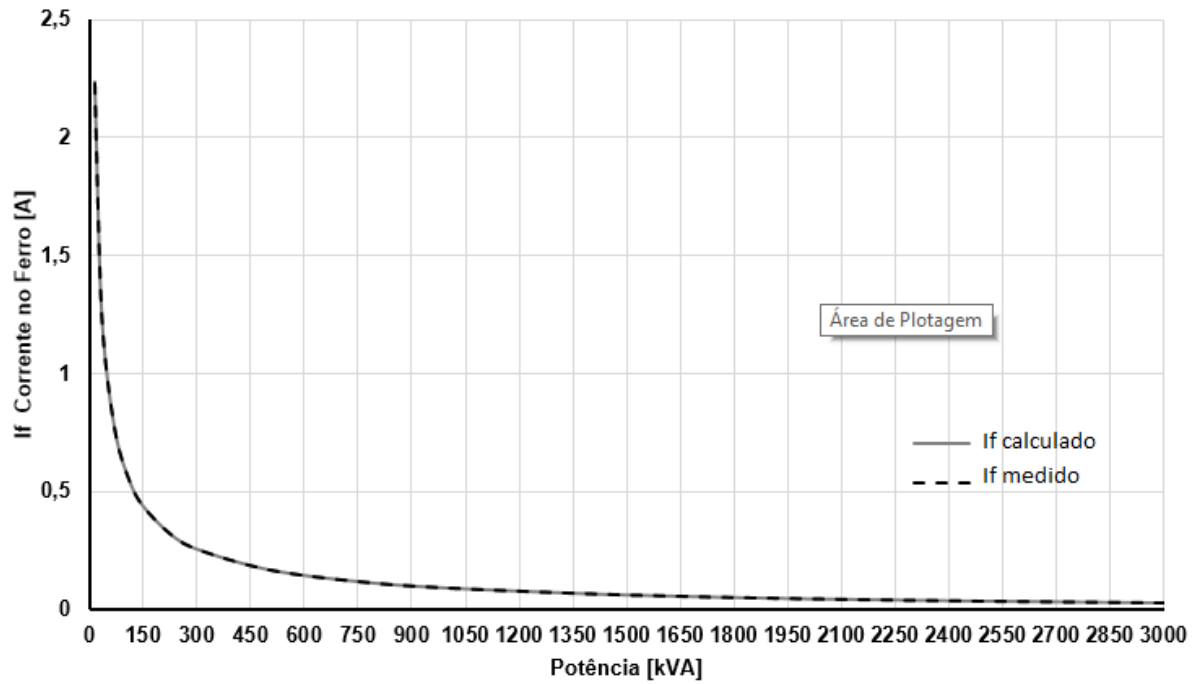
$S$ : potência em [kVA]

No gráfico de número 4, novamente, tem-se uma aproximação entre os valores obtidos. Sendo assim, os valores são próximos o bastante para que se possa fazer uso da Equação (4.3).

$$I_f = 25,262 \cdot S^{-0,827} \quad (4.3)$$

$I_f$ : corrente do ferro [A]

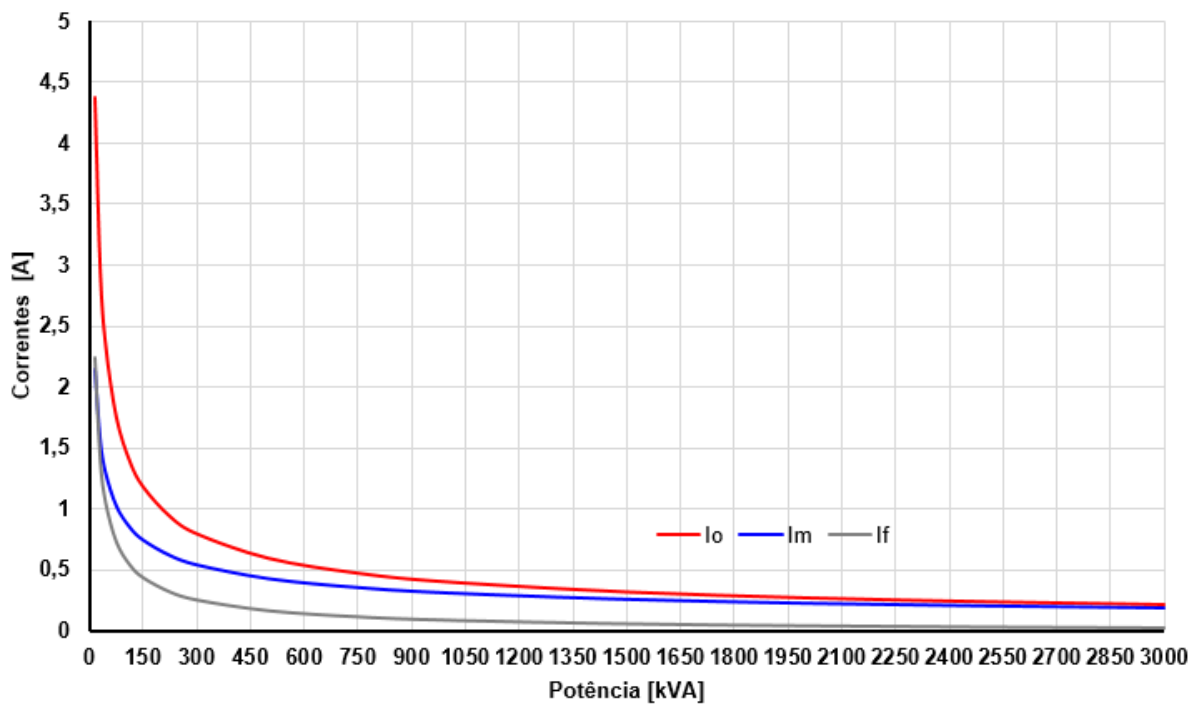
S: potência em [kVA]



**Gráfico 4: Valores da corrente do ferro x potência.**

Fonte: Autoria própria.

No gráfico 5 são mostradas as três correntes: de excitação, de magnetização e do ferro determinadas pelo método estatístico.



**Gráfico 5: Valores das correntes do núcleo x potência.**

Fonte: Autoria própria.

Deve ser ressaltado que o uso das fórmulas determinadas por meio dos valores analisados estatisticamente apenas é válido para um grupo de transformadores, os quais tenham o seu aço confeccionado pelo mesmo fabricante. No Brasil, por exemplo, a maior parte das máquinas possuem aço da Acesita, com um fluxo magnético de 1,5 a 1,8T.

Em relação ao erro relativo, este mostra mais uma comparação entre os valores estimados empiricamente e os medidos, o qual está exposto na Tabela 3.

**Tabela 3: Erro relativo.**

P[kVA]	$E_{Io}\%$	$E_{Im}\%$	$E_{If}\%$
15	0,227764	0,184042	0,269679
30	1,021883	0,825092	1,242699
45	0,3415	0,275914	0,422314
75	0,174654	0,141134	0,221619
112,5	0,04052	0,032747	0,052667
150	0,064573	0,052185	0,085603
225	0,058244	0,047071	0,079723
300	0,085457	0,069062	0,120117
501	0,116209	0,093911	0,172952
750	0,023554	0,019036	0,037128
1000	0,063813	0,051572	0,105815
1500	0,03267	0,026404	0,059275
2000	0,012252	0,009902	0,02416
2500	0,042166	0,034078	0,090187
3000	0,003229	0,00261	0,007487

Sendo esses valores todos calculados por meio das seguintes Equações:

$$E_{Io}\% = \frac{|I_{om} - I_{or}|}{I_{or}} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

$$E_{Im}\% = \frac{|I_{mm} - I_{mr}|}{I_{mr}} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

$$E_{If}\% = \frac{|I_{fm} - I_{fr}|}{I_{fr}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

Pode-se observar que os valores podem ser considerados insignificantes, uma vez que a maior diferença percentual é de aproximadamente 1,24%, valor este designado à corrente do ferro. Para as correntes de excitação e magnetização, os maiores erros registrados foram de 1,02% e 0,82%, respectivamente. Como pode ser

observado na tabela acima, esses valores calculados são exclusivamente para os transformadores de 30kVA. Quanto às outras máquinas elétricas desse tipo, os erros relativos foram inferiores a 0,3%.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao seu uso constante de transformadores elétricos, inúmeros ensaios são efetuados para comparar, conferir, determinar e analisar suas características. Os objetivos deste trabalho é reduzir a realização destes ensaios para o caso da determinação das correntes do núcleo.

O ensaio para verificar todas as características do núcleo de transformadores apresenta um preço médio de R\$1.000,00 (informação fornecida pela empresa). Isto sem contar o gasto com o tempo e mão-de-obra. Logo, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um método que possibilite uma análise preliminar das características do equipamento de forma rápida, barata e efetiva para os supervisores de produção. Este método consistiu de um estudo estatístico de uma população de 1500 transformadores, a qual foi subdividida em 15 amostras, ou seja, 100 transformadores por potência, de uma empresa de transformadores à óleo do Norte do Paraná. Para isso foi feita a coleta de dados por meio de ensaios, os quais foram estudados e avaliados estatisticamente, os valores médios foram organizados em uma tabela a qual foi comparada com os valores obtidos diretamente dos ensaios, ou seja, sem análise. Uma vez organizados os dados, por meio do programa *Excel*, foram plotados gráficos para facilitar a comparação dos resultados adquiridos e foram obtidas, por meio das curvas geradas, as novas equações padrões para o cálculo das correntes.

Com a análise dos gráficos e da tabela do erro relativo concluiu-se que o método proposto é válido. A maior discrepância observada foi para a corrente no ferro, por consequência do magnetismo residual. O que também é possível de se verificar na Tabela 3, aonde esta mesma corrente apresenta o maior erro calculado, que foi de 1,24%. Para as correntes de excitação e magnetização, o método também se demonstrou próximo aos valores obtidos dos ensaios. O maior erro relativo para a corrente de excitação foi de 1,02%, que foi o segundo maior valor registrado. Já para a corrente de magnetização, que foi a que se demonstrou mais exata, o maior erro determinado foi de 0,82%. Vale ressaltar, que todas essas porcentagens foram para o transformador de 30kVA. Em relação aos outros transformadores, nenhum erro ultrapassou a faixa de 0,3%. Logo, considerando que cada valor é sobre uma amostra

de 100 transformadores, esses resultados são pequenos o suficiente para validar a proposta e permitir o uso das novas equações geradas. Desse modo, para a finalidade de determinação dessas correntes do núcleo, é possível substituir os ensaios dispendiosos economicamente e cronologicamente, pelo uso de tais equações.

A partir desse trabalho surge a possibilidade de novos estudos ou melhorias para o problema do grande número de ensaios feitos para se determinar as características do núcleo de transformadores a óleo. Este trabalho pode ser considerado, por exemplo, no estudo de transformadores para ligas de núcleo de metal amorfo.

## REFERÊNCIAS

- BUSSAB, W. de O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 7ed. São Paulo: Saraiva, 2011.
- CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 5ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 2012.
- COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blüncher, 2002.
- CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2ª ed. New Jersey: IEEE Press, John Wiley & Sons, 2009.
- DEL TORO, V. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- DIAS, V. F. **Transformadores Ideais**. 1999. Disponível em: <[http://www.ufrgs.br/eng04030/aulas/teoria/cap\\_13/transfid.htm](http://www.ufrgs.br/eng04030/aulas/teoria/cap_13/transfid.htm)>. Acesso em: 16 mar 2012.
- GEROMEL, L. H. **Aplicação de Sistemas Inteligentes em Projetos de Transformadores de Potência**. 2003. 144f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.
- FALCO, J. G. **Estatística aplicada**. Cuiabá: EdUFMT. Curitiba: UFPR, 2008.
- FINOCCHIO, M. A. F. **Determinação da Temperatura de Enrolamentos de transformadores a Seco e de suas Perdas Totais Baseado em Redes Neurais Artificiais**. 2010. 99f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2010.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas – com introdução a Eletrônica de Potência**. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- KOSOW, I.L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15ª ed. São Paulo: Globo, 2005.
- LANDGRAF, Fernando J. G., **Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2012.
- LARSON, R. FARBER, B. **Estatística aplicada**. 4a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- LISITA, Luiz R., **Conversão eletromecânica de energia**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, 2000.



MOSES, A. J. **Electrical steels: past, present and future developments**. IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education), Volume 137, Issue 5, 1990.

NOGUEIRA, D. S.; ALVES, D. P. **Transformadores de Potência – Teoria e Aplicação. Tópicos Essenciais**. 2009. 212f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

ROSSETTI, J; P.; GALVÃO, A.; BRESSAN, A. A.; et al. **Finanças corporativas**. Teoria e prática empresarial no Brasil. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

SAMBAQUI, Ana B. K. **Apostila de Máquinas Elétricas I**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina Joinville, 2008.

VIERA, G. A.; PINTO, M. F.; TEIXEIRA JÚNIOR, M. J.; FRAGA, B. L.; SILVEIRA, F. S.; OLIVEIRA, R. W. **Materiais Amorfos**. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~jramirez/disciplinas/materiais/trab1.pdf>>. Acesso em: 20 mar 2012.